

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.015.

魏亚娟, 刘美英, 解云虎, 等. 希拉穆仁荒漠草原围封区植物群落土壤有机碳研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 35-43.

Wei Yajuan, Liu Meiyong, Xie Yunhu, et al. Study on Soil Organic Carbon of Plant Communities in Enclosed Area of Xilamuren Desert Grassland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 35-43.

# 希拉穆仁荒漠草原围封区植物群落土壤有机碳研究

魏亚娟<sup>1</sup>, 刘美英<sup>2</sup>, 解云虎<sup>1</sup>, 高玉寒<sup>1</sup>, 刘美萍<sup>1</sup>, 悦普庆<sup>1</sup>, 刘澜波<sup>3</sup>

(1.包头师范学院资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030; 2.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010018; 3.内蒙古自治区包头市气象局, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:** [目的]明晰各植物群落土壤有机碳含量, 以为草原保护提供理论依据。[方法]以希拉穆仁荒漠草原围封区 6 种植物群落(短花针茅、洽草、羊草、克氏针茅、银灰旋花、蒙古韭)为研究对象, 对 0—30 cm 土层各植物群落土壤机械组成、土壤有机碳含量和根系特征进行研究。[结果](1) 6 种植物群落 0—30 cm 土层土壤机械组成主要以粉粒和极细砂为主, 其平均值分别介于 26.50%~54.62% 和 16.90%~34.08%。(2) 6 种植物群落根系生物量随土层深度逐渐减小, 且根系生物量总量介于 229.21~731.71 g/m<sup>2</sup>。由根系分布特征判断, 短花针茅群落各土层根系呈“E”型分布, 其他植物群落均呈“V”型分布。(3) 各植物群落土壤有机碳含量随土层深度逐渐降低。0—30 cm 平均有机碳含量介于 6.07~11.75 g/kg。(4) 根系生物量、土壤有机碳含量与黏粒含量呈极显著正相关, 与粉粒含量呈显著正相关, 表明土壤粉粒、黏粒含量越多, 植物群落根系生物量和土壤有机碳越丰富。[结论]围封可以有效促使土壤有机碳增加, 但有机碳对不同植被群落的响应有所差异, 草原有机碳储量准确度应根据草原植被群落特征而定。

**关键词:** 植物群落; 根系生物量; 有机碳; 土壤机械组成; 围封区; 希拉穆仁

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0035-09

## Study on Soil Organic Carbon of Plant Communities in Enclosed Area of Xilamuren Desert Grassland

Wei Yajuan<sup>1</sup>, Liu Meiyong<sup>2</sup>, Xie Yunhu<sup>1</sup>, Gao Yuhang<sup>1</sup>, Liu Meiping<sup>1</sup>, Yue Puqing<sup>1</sup>, Liu Lanbo<sup>3</sup>

(1. Department of Resource and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030,

China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of

Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

3. Baotou Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

**Abstract:** The aims of this study are To clarify soil organic carbon content of each plant community and to provide a theoretical basis for grassland conservation. [Methods] Six plant communities (*Stipa breviflora*, *Koeleria cristata*, *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii*, *Convolvulus ammannii*, *Allium mongolicum*) in the enclosed area of Xilamuren Desert Grassland were studied for soil mechanical composition, soil organic carbon content and root characteristics of different plant communities. [Results] (1) The soil mechanical composition of soil depth of 0—30 cm in six plant communities was mainly composed of silt and extremely fine sand, with the average values of 26.50%~54.62% and 16.90%~34.08%, respectively. (2) The root biomass of six plant communities gradually decreased with soil depth, and the total root biomass was between 229.21 and 731.71 g/m<sup>2</sup>. Judging from characteristics of root distribution, the root distribution of *Stipa breviflora* was ‘E’ type

收稿日期: 2023-01-23

修回日期: 2023-02-01

**资助项目:** 自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX202213); 包头师范学院高层次人才引进科研启动基金项目(BTTTCRCQD2020-011); 包头师范学院自然科学类一般项目(BSYKJ2021-ZY02); 包头师范学院自然科学类重点项目(BSYKJ2022-ZZ01); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41901009); 包头师范学院高层次人才引进人才科研启动基金(01108022/008); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS04004)

**第一作者:** 魏亚娟(1994—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: weiyajuan0305@163.com

**通信作者:** 解云虎(1987—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: xieyhsd@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

distribution, and the root distributions other plant communities were ‘V’ type distribution. (3) Soil organic carbon content of six plant communities gradually decreased with soil depth. The average organic carbon content in 0—30 cm ranged from 6.07 to 11.75 g/kg. (4) There was a significant positive correlation between root biomass, soil organic carbon and clay, and a significant positive correlation with silt, indicating that the more soil particles and clay content, the richer the root biomass and soil organic carbon of different plant communities. [Conclusion] Enclosure could effectively promote the increase of soil organic carbon, but organic carbon varied in response to different vegetation communities. The accuracy of grassland organic carbon storage should be determined according to the characteristics of grassland vegetation communities.

**Keywords:** plant community; root biomass; organic carbon content; soil mechanical composition; enclosed area; Xilamuren

草地生态系统作为陆地三大生态系统之一,具有巨大的固碳能力<sup>[1]</sup>。我国草原面积约为  $4.0 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>, 占全国总面积的 40% 以上, 且草地生态系统约 80% 的碳储存于土壤中<sup>[2]</sup>。随着全球气候变暖, 草原生态系统中的土壤有机碳对气候变化比较敏感。因此, 草原的合理利用与发展对土壤碳汇起着重要作用。而且, 在全球气候变暖背景条件下, 草原土壤有机碳的分布特征及其影响因素已成为全球研究热点<sup>[3]</sup>。

近年来, 学者们针对围封区土壤有机碳的研究较多。学者们研究发现, 土壤有机碳主要受植被群落自身特征、凋落物、分泌物和土壤理化性质等因素影响<sup>[4-8]</sup>。由于植被与土壤具有互动效应。植被对土壤影响主要来源于 3 个方面。其一, 不同植被类型下, 植被群落组成、多样性会直接或间接影响有机碳的分解速率和分解模式, 进而影响土壤有机碳含量<sup>[4-5]</sup>; 其二, 植物死亡或枯萎, 凋落物分解会影响有机碳输入质量和数量, 进而影响有机碳累积; 其三, 植物根系作为植物和土壤进行物质交换和能量流动的纽带, 植物将光合作用固定的 CO<sub>2</sub> 以根系分泌物的形式释放到土壤中<sup>[6]</sup>。另外, 根系死亡经过土壤微生物的分解将有机物释放到土壤中。还有研究得出, 土壤机械组成、水分、容重和速效养分含量等会影响土壤微生物活性进而影响土壤有机碳含量<sup>[7-8]</sup>。因此, 草原有机碳含量的差异及其影响机制是否由植物群落决定有待于进一步明晰。

希拉穆仁草原位于阴山北麓属典型荒漠草原, 是草原向荒漠的过渡带<sup>[9]</sup>。该区域降雨稀少、季风强劲, 土壤侵蚀严重, 导致该地区生态环境脆弱。加之草原植被结构简单、结构稳定性差, 容易遭受破坏。近年来, 随着国内旅游业的大力发展使草原生态环境严重破坏, 造成草原破碎化, 地表板结程度较高和地表粗粒化<sup>[10]</sup>。目前, 关于希拉穆仁草原的研究多集中在地表风蚀特征<sup>[11-12]</sup>、植被群落特征<sup>[13]</sup>、土壤理化

性质<sup>[14-15]</sup>。这些研究在一定程度上揭示了草原土壤、植物生长变化规律。然而, 针对不同植被群落的研究相对较少。基于此, 本研究以希拉穆仁草原围封区 6 种植物群落(短花针茅(*Stipa breviflora*)、洽草(*Koeleria cristata*)、羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*))为研究对象, 通过对各植被群落 0—30 cm 土壤机械组成、根系分布、有机碳变化特征及三者间相互关系进行研究, 以期为当地围封禁牧提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于希拉穆仁草原围封区(110°00′—110°20′E, 41°12′—41°31′N), 围封时间为 14 a, 围封面积为 133 hm<sup>2</sup>。海拔在 1 642 m 左右, 该区属中温带半干旱大陆性季风气候, 年均降雨量约为 281 mm, 且主要集中在 7—9 月, 占全年降雨量的 55% 以上。该区域蒸发量年际变化大, 蒸发量在 2 305 mm; 年均气温在 2.5℃。风沙天气多发生在春、冬两季, 且主要以北风和西北风为主, 年均风速在 5.2 m/s 左右。土壤类型主要以栗钙土和棕钙土为主, 土层厚度在 30~80 cm。植物结构类型简单, 多以旱生、中旱生植物为主。优势植物为克氏针茅和冷蒿(*Artemisia frigida*)。围封前, 对围封区进行定点植被调查和土壤理化性质测定, 如表 1 和表 2 所示。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 于 2018 年 8 月中旬, 在围封区内, 沿东西方向布设 8 条长 300 m 的样线, 每条样线相隔 50 m。每条样线分别设置 6 个 1.0 m×1.0 m 的样方, 共设置样方 48 个。首先, 根据样方内优势种特征, 对每个样方内植物种数量、平均高度、盖度、地上生物量、枯落物进行测定, 以便调查植物群落变化。然后在每个样方内, 将地表杂物清除后, 按五点法用

根钻分别钻取 0—5,5—10,10—20,20—30 cm 的土样,将取出的根土混合样品装入自封袋带回实验室。在根系取样的同时,用环刀取每层土壤样品,并称鲜

重用于土壤含水量、土壤容重测定;同时每层另取一份土样与同一植物群落其他样方和土层深度土样均匀混合后,用于机械组成和有机质的测定。

表 1 围封前希拉穆仁草原土壤特征  
Table 1 Soil characteristics of Xilamuren grassland before enclosure

指标	土层深度/cm			
	0—5	5—10	10—20	20—30
土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.63±0.12	1.64±0.15	1.59±0.07	1.43±0.11
土壤含水量/%	1.24±0.47	3.11±0.25	3.59±0.18	4.74±0.13
根生物量系/(g·m <sup>-2</sup> )	150.32±20.35	40.32±8.47	21.23±8.35	4.11±0.45
SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.27±1.37	5.05±0.84	4.26±0.57	4.15±0.38

表 2 样地基本情况调查  
Table 2 Basic situation questionnaire

围封年限 优势群落	围封前	围封后					
	克氏针茅+冷蒿	短花针茅	治草	羊草	克氏针茅	银灰旋花	蒙古韭
平均高度/cm	3.50±0.71	45.37±4.11	35.52±4.08	30.04±2.98	38.61±6.73	12.75±1.87	25.28±0.97
盖度/%	38.00±11.41	48.42±8.34	95.00±15.12	80.22±7.55	45.34±5.47	70.48±9.09	45.37±6.44
地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	88.79±37.34	305.02±33.51	532.18±44.64	341.48±24.90	444.63±54.21	323.06±22.25	187.07±16.54
枯落物/(g·m <sup>-2</sup> )	10.00±0.65	127.16±8.45	114.67±10.56	96.94±6.39	105.74±5.77	12.39±2.37	78.70±5.26

1.2.2 根系生物量测定 将根系土壤样品带回实验室,置于 0.05 mm 网筛上进行冲洗,直至将根系上的土壤冲洗干净,冲洗过程中将根系中的杂质和黑色死根挑拣干净,用吸水纸吸干根系表面水分。最后,将不同土层活根系分别装入信封内放入 65℃烘箱内连续烘干 48 h 至恒重,以便获得根系生物量。

1.2.3 土壤理化性质测定 土壤容重用环刀法进行测定,土壤水分采用烘干法进行测定<sup>[16]</sup>。土壤粒度采用美国制<sup>[17]</sup>,分别为黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细粒(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)、极粗砂(1 000~2 000 μm)和砾石(>2 000 μm)。土壤有机碳用浓硫酸—重铬酸钾氧化法测定<sup>[18]</sup>。

1.3 数据处理

利用 Excel 对数据进行统计整理。用 SPSS 20.0 对不同植物群落各土层土壤机械组成、土壤容重、水分、根系生物量和土壤有机碳进行单因素方差分析(ANOVA),再利用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验( $p<0.05$ )。并对各指标进行相关分析。最后,利用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落土壤机械组成特征

由表 3 知,6 种植物群落 0—30 cm 土层土壤机械组成主要以粉粒和极细砂为主,其平均值分别介于 26.50%~54.62%和 16.90%~34.08%之间。粉粒平

均值大小由大到小依次为:短花针茅(54.62%)>治草(40.75%)>银灰旋花(36.89%)>羊草(27.48%)>克氏针茅(27.44%)>蒙古韭(26.50%);极细砂平均值由大到小依次为:银灰旋花(34.08%)>羊草(32.06%)>蒙古韭(30.47%)>短花针茅(25.16%)>治草(23.57%)>克氏针茅(16.90%)。短花针茅和治草各土层含有少量土壤黏粒,含量在 0.08%~0.24%。表明土壤细粒结构越好,有利于水分的保存。

2.2 不同植物群落土壤容重和水分变化特征

土壤是植物生长发育的载体,其土壤物理性质影响着植物的生长发育。由图 1A 知,各植物群落土壤容重平均值介于 1.34~1.57 g/cm<sup>3</sup>。克氏针茅、羊草、治草、短花针茅土壤容重随土层深度增大,而蒙古韭、银灰旋花土壤容重随土层深度呈先减小后增加的趋势。在 0—5 cm,治草土壤容重与克氏针茅差异不显著( $p>0.05$ ),与其他群落差异显著( $p<0.05$ );在 5—10 cm,治草与羊草差异不显著( $p>0.05$ ),与其他群落差异显著( $p<0.05$ );在 10—30 cm,治草与克氏针茅、短花针茅差异显著( $p<0.05$ ),说明围封降低了希拉穆仁草原土壤容重(表 1),其中以羊草与治草效果最明显。

土壤水分是影响植物生长发育的主要因子之一。由图 1B 知,除银灰旋花和克氏针茅外,其余植物群落均呈先增大后减小的趋势。各植物群落土壤水分平均值介于 5.68%~8.28%。在 0—5 cm,蒙古韭土壤水分含量最低,为 6.88%,与克氏针茅差异不显著( $p>0.05$ ),与其他植物群落差异显著( $p<0.05$ );在

5—10 cm,银灰旋花与克氏针茅差异不显著( $p>0.05$ ),与其他植物群落差异显著( $p<0.05$ );在 10—20 cm,短花针茅与洽草、羊草差异不显著( $p>0.05$ ),与其他植物群落差异显著( $p<0.05$ );在 20—30 cm,短

花针茅与银灰旋花、克氏针茅差异显著( $p<0.05$ ),与其他植物群落差异不显著( $p>0.05$ )。表明围封增加了土壤含水量(表 1),其中以羊草和短花针茅土壤含水量增加幅度最大。

表 3 不同植物群落土壤机械组成  
Table 3 Soil mechanical composition of different plant communities

土层 深度/cm	植物群落	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%					砾石/%
				极细粒	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	
0—5	短花针茅	0.17±0.03Aa	65.70±11.43Aa	19.32±6.21Bb	8.70±0.84Cc	4.98±1.21Bc	1.13±0.37Bd	0Be	0A
	洽草	0.24±0.09Aa	54.62±15.74Aa	14.17±2.69Bb	5.54±1.09Bc	4.51±1.03Bc	7.77±1.36Bb	9.16±1.16Aa	3.99±1.01Aa
	羊草	0Ac	25.73±8.37Ab	23.15±4.37Ba	24.06±4.67Aa	14.73±3.14Aa	11.40±2.16Aa	0.93±0.22Bd	0Ad
	克氏针茅	0.11±0.02Aa	64.31±15.44Aa	31.56±10.24Aa	4.02±1.03Bc	0Cd	0C	0Ce	0Cd
	银灰旋花	0.05±0.02Bb	36.53±9.44Bb	23.30±6.75Ca	17.13±4.36Bb	9.40±2.14Ab	10.20±2.16Aa	2.97±0.34Ac	0.42±0.11Ac
	蒙古韭	0Ac	29.85±6.35Ab	26.77±4.02Ba	20.57±6.78Aa	11.25±3.15ABa	4.82±1.26Cc	4.15±1.11Ab	2.59±0.69Ab
5—10	短花针茅	0.10±0.01Ba	46.45±11.12Ba	22.00±5.36Bb	16.49±0.34Ab	6.90±0.56Ab	7.36±2.03Ab	0.70±0.15Ad	0Ac
	洽草	0.13±0.04Aa	48.46±10.32Aa	30.11±6.31Aa	19.52±2.59Aa	1.78±0.23Cc	0Cd	0Ce	0Bc
	羊草	0Ab	28.30±4.36Ab	28.73±8.43Ba	20.58±7.26Aa	9.87±1.38Bb	10.37±2.36Ab	2.15±0.64Ac	0Ac
	克氏针茅	0Bb	19.27±4.25Bc	14.43±1.27Bc	13.69±3.47Ab	12.29±2.47Ba	17.59±2.17Ba	16.32±4.15Aa	6.41±2.13Aa
	银灰旋花	0Cb	29.90±5.33Bb	33.32±8.11Ba	26.62±5.43Aa	7.16±2.10ABb	3.00±1.07Bc	0Be	0Bc
	蒙古韭	0Ab	17.12±4.89Bc	20.55±3.36BCb	25.26±5.44Aa	16.42±3.36Aa	11.68±2.16Ab	6.35±4.37Ab	2.62±0.88Ab
10—20	短花针茅	0.09±0.02Ba	49.25±7.56Ba	28.50±4.31Aa	11.96±1.05ABb	7.52±1.36Ac	2.68±0.36Bd	0Bd	0Ab
	洽草	0.08±0.02Ba	28.60±6.71Bc	18.69±5.10Bb	22.22±4.78Aa	14.86±3.66Ab	13.49±2.54Ab	2.06±0.34Bb	0Bb
	羊草	0Ab	31.09±8.16Ab	30.32±9.14Ba	20.03±4.36Aa	9.24±2.14Bc	8.76±3.12Ac	0.56±0.12Bc	0Ab
	克氏针茅	0Bb	14.37±6.01Bc	6.52±1.10Cc	14.47±4.11Ab	21.55±6.17Aa	28.36±4.74Aa	12.11±2.37Ba	2.62±0.75Ba
	银灰旋花	0Cb	33.48±9.59Bb	35.82±12.31Ba	23.74±2.87Aa	5.20±2.36Bd	1.76±0.53Bd	0Bd	0Bb
	蒙古韭	0Ab	31.53±10.11Ab	28.61±6.42Ba	23.39±4.63Aa	9.23±3.45Cc	6.69±1.56Bc	0.55±0.14Bc	0Bb
20—30	短花针茅	0.15±0.03Aa	57.06±16.45ABa	30.81±6.78Ab	3.59±0.36Db	7.51±2.14Ab	0.88±0.21Cc	0Bd	0Ab
	洽草	0.09±0.02Bb	31.31±8.12Bb	31.31±5.25Ab	5.74±1.22Ba	16.56±3.38Aa	13.73±3.97Ab	1.26±0.15Bb	0Bb
	羊草	0Ac	24.81±7.26Ab	46.05±14.32Aa	6.62±2.52Ba	13.19±2.19Aa	8.68±2.52Ab	0.65±0.21Bc	0Ab
	克氏针茅	0Bc	11.81±2.14Bc	15.09±4.68Bc	3.95±0.99Bb	18.62±4.69Aa	31.62±5.39Aa	15.79±3.16Aa	3.12±1.14Ba
	银灰旋花	0.13±0.03Aa	46.83±10.59Aa	43.89±14.16Aa	4.08±1.34Cb	5.07±1.03Bb	0C	0Bd	0Bb
	蒙古韭	0Ac	27.51±6.33Ab	45.96±13.88Aa	5.80±1.00Ba	11.83±1.55ABa	8.63±2.06Bb	0.27±0.05Bc	0Bb

注:不同大写字母表示同一植物群落不同土层深度之间的显著差异( $p<0.05$ )。不同小写字母表示同一土层深度不同植物群落之间的显著区别( $p<0.05$ )。

2.3 不同植物群落根系分布特征和空间构型

由图 2 知,不同植物群落根系生物量随土层深度逐渐减小,且根系生物量总量依次表现为:洽草(731.71 g/m<sup>2</sup>)>羊草(356.16 g/m<sup>2</sup>)>克氏针茅(305.73 g/m<sup>2</sup>)>蒙古韭(299.74 g/m<sup>2</sup>)>短花针茅(268.00 g/m<sup>2</sup>)>银灰旋花(229.21 g/m<sup>2</sup>),最大值是最小值的 2.19 倍。在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层,洽草与各植物群落差异显著( $p<0.05$ )。在 10—20 cm 土层,银灰旋花与其他植物群落差异显著( $p>0.05$ );在 20—30 cm 土层,各植物群落差异不显著( $p>0.05$ )。说明各植被群落根系生物量主

要集中在 0—5 cm 土层,占总根系生物量的 58.41%~70.59%。为有机碳的输入准备了条件。

植物根系生物量的空间差异性影响着地上生物量的变化与稳定。由图 3 知,短花针茅根系垂直空间分布呈“E”型,即:根系生物量呈锯齿状分布;其他植物群落呈“V”型,即:植物根系生物量自上而下呈倒金字塔型分布。

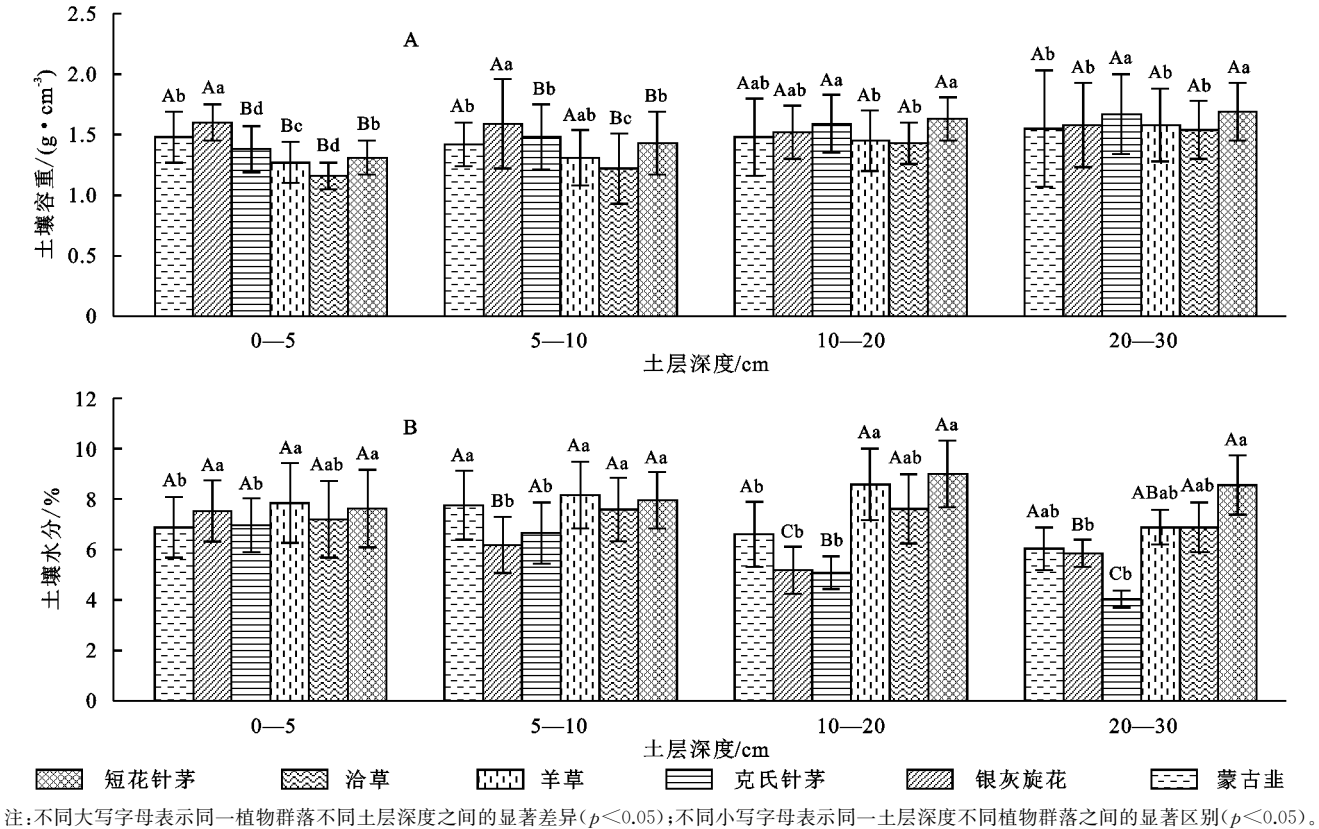
2.4 不同植物群落有机碳特征

土壤有机碳是衡量土壤肥力的重要指标,土壤有机碳的分解和积累影响着土壤肥力。由图 4 知,各



植物群落土壤有机碳含量随土层深度逐渐降低,说明有机碳具有明显的表聚作用。0—30 cm 土层平均有机碳含量依次为:洽草(11.75 g/kg)>羊草(8.41 g/kg)>短花针茅(7.54 g/kg)>蒙古韭(7.17 g/kg)>克氏针茅(7.14 g/kg)>银灰旋花(6.07 g/kg),最大值是最小值的

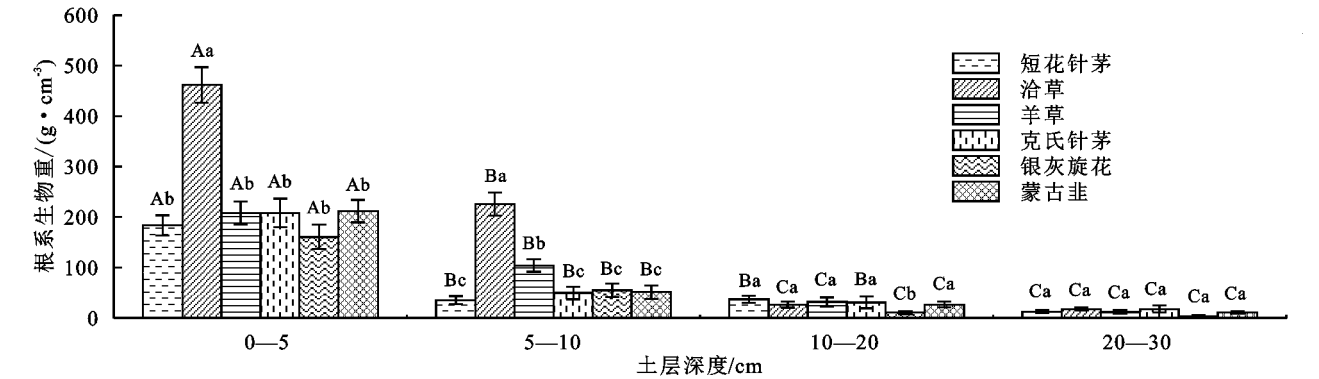
0.94 倍。在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层,最大值和最小值分别为洽草和银灰旋花。最大值分别是最小值的 0.83 倍和 1.48 倍。在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,最大值和最小值分别为洽草和克氏针茅,最大值分别是最小值的 0.94 倍和 0.69 倍。



注:不同大写字母表示同一植物群落不同土层深度之间的显著差异( $p<0.05$ );不同小写字母表示同一土层深度不同植物群落之间的显著区别( $p<0.05$ )。

图 1 不同植物群落土壤容重和水分变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of soil bulk density and water content in different plant communities



注:不同大写字母表示同一植物群落不同土层深度之间的显著差异( $p<0.05$ );不同小写字母表示同一土层深度不同植物群落之间的显著区别( $p<0.05$ )。

图 2 不同植物群落根系生物量

Fig. 2 Root biomass of different plant communities

2.5 不同植物群落根系生物量与土壤机械组成、有机碳含量相关性研究

由表 4 可知,各植物群落根系生物量、土壤有机碳与黏粒呈极显著正相关,与粉粒呈显著正相关,表明土壤粉粒、黏粒含量越多,不同植物群落根系生物量和土壤有机碳越丰富。土壤水分与粉粒呈显著相

关,与粗砂和极粗砂呈显著负相关,说明土壤粉粒增多,有利于土壤保持水分,土壤粗粒和极粗粒增多,不利于土壤水分保持。土壤容重与根系生物量、土壤有机碳分别呈极显著负相关。此外,研究中还发现,植物根系生物量与土壤有机碳呈极显著正相关,表明不同植物根系有利于增加土壤养分含量。

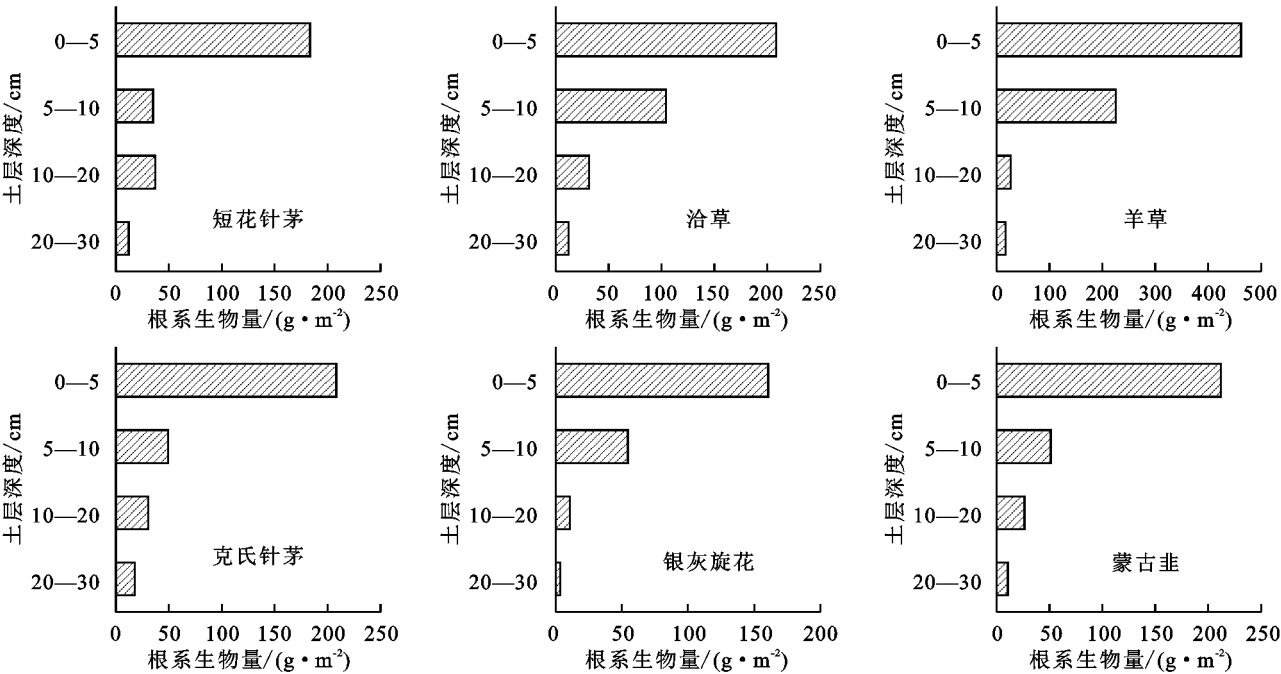
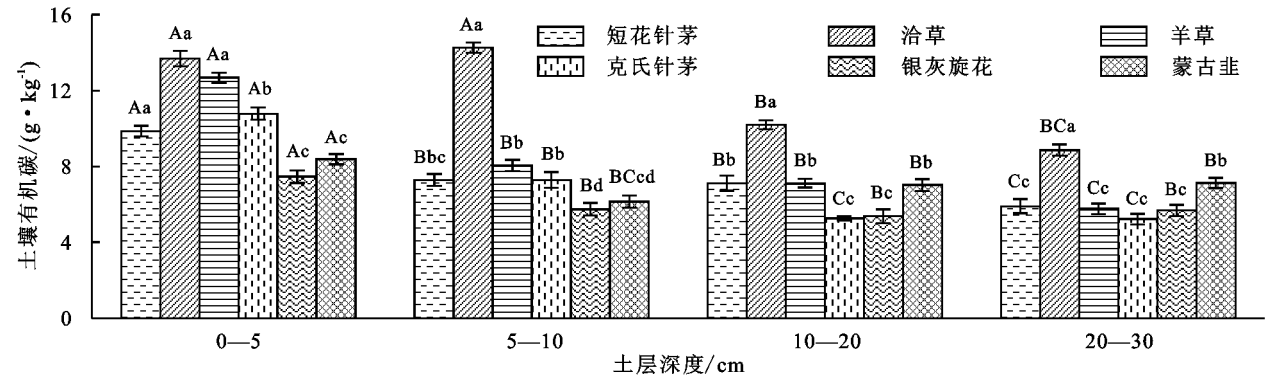


图 3 不同植物群落根系空间分布

Fig. 3 Root vertical distribution in different plant communities



注:不同大写字母表示同一植物群落不同土层深度之间差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示同一土层深度不同植物群落之间差异显著( $p<0.05$ )。

图 4 不同植物群落土壤有机碳含量

Fig. 4 Soil organic carbon content of different plant communities

表 4 土壤机械组成与根系生物量、土壤有机碳的相关关系

Table 4 Relationships between soil mechanical composition, root biomass and soil organic carbon

参数	黏粒	粉粒	极细粒	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	砾石	土壤容重	土壤水分	根系生物量	土壤有机碳
黏粒	1.000											
粉粒	0.837 **	1.000										
极细粒	-0.100	0.170	1.000									
细砂	-0.508 *	-0.380	-0.160	1.000								
中砂	-0.564 **	-0.837 **	-0.360	0.100	1.000							
粗砂	-0.432 *	-0.752 **	-0.590 **	-0.050	0.853 **	1.000						
极粗砂	-0.190	-0.519 **	-0.696 **	-0.140	0.531 **	0.798 **	1.000					
砾石	-0.090	-0.370	-0.613 **	-0.090	0.330	0.536 **	0.914 **	1.000				
土壤容重	-0.350	-0.300	0.240	-0.240	0.350	0.230	0.080	-0.060	1.000			
土壤水分	0.320	0.438 *	0.030	0.180	-0.300	-0.469 *	-0.466 *	-0.310	-0.340	1.000		
根系生物量	0.516 **	0.432 *	-0.310	-0.040	-0.400	-0.22	0.080	0.240	-0.745 **	0.210	1.000	
土壤有机碳	0.522 **	0.427 *	-0.200	0.030	-0.360	-0.250	-0.140	-0.020	-0.843 **	0.370	0.802 **	1.000

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

### 3 讨论

土壤机械组成不仅改变植物根系分布和营养吸收,而且影响着土壤结构和土壤通透性。本研究中,与 20—30 cm 相比,银灰旋花 0—5 cm 土壤黏粒和粉粒分别减少 61.54% 和 21.99%,砂粒增加 18.78%。由此可知,银灰旋花群落退化较为严重,地表出现了风蚀,导致表层细粒物质被搬运,从而使地表颗粒组成粗粒化<sup>[19-20]</sup>。由于银灰旋花属指示草原退化的植被,说明在草地围封 14 a 后,部分地区呈现出斑块状态<sup>[21]</sup>。短花针茅、洽草群落表层土壤黏粒分别增加 13.33%, 166.67%。而其他植物群落表层土壤粉粒分别增加 3.71%~444.54%,砂粒分别减少 1.22%~58.18%。土壤细粒物质增加,增强了地表土壤的抗侵蚀能力。相关分析发现,土壤黏粒和粉粒与土壤有机碳呈极显著或显著正相关,说明黏粒和粉粒增加有利于有机碳输入。

本研究发现,除银灰旋花、蒙古韭外,其他植物群落土壤容重均随土层深度增大,这可能与群落根系生物量有关。因为植物根系通过克服土壤机械阻力不断向下和周边延伸生长,导致土壤孔隙度增加。为微生物的繁殖和土壤养分的积累奠定了基础<sup>[7]</sup>。而且,与 20—30 cm 相比,银灰旋花表层土壤容重增加 1.25%,其他植物群落分别减小 4.73%~32.76%。这不利于土壤有机碳积累。因为土壤容重增加,导致孔隙度降低,土壤通气性和透水性变差,不利于枯落物转化为土壤有机碳。相关分析发现土壤容重与土壤有机碳呈极显著负相关,也证明了这一点<sup>[9]</sup>。土壤水分影响着植物对土壤养分的吸收与利用。本研究中,除短花针茅外,其他植物群落较 20—30 cm 相比,表层土壤水分增加 4.50%~72.70%。根据相关分析发现土壤水分与土壤粉粒呈显著相关,说明土壤粉粒增加,有利于土壤蓄积水分,为土壤有机碳矿化和植被恢复奠定了良好的基础。

植物根系是土壤有机碳的重要来源,对提高土壤质量具有重要意义<sup>[22]</sup>。本研究发现,各群落植物根系整体由上至下逐渐减小,且植物根系主要存在于 0—5 cm 土层,占总植被生物量的 58.42%~70.59%,说明各植物群落主要存在于土壤表层,且各植物群落根系在空间分布上具有差异性。而且,除短花针茅群落根系呈“E”型分布,其他植物群落均呈“V”型分布。这主要与植物自身遗传特征有关,该研究结果与魏巍等<sup>[23]</sup>对青藏高原不同草地类型的研究结果相同。相关分析发现,根系生物量与黏粒和粉粒呈极显著或显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关。该结果与牛存洋等<sup>[24]</sup>对固沙植物的研究结果不同,其研究表明

水分不是限制植物群落根系生物量的主要因子。这主要是因为土壤细粒物质增加,改善了土壤结构,增加了土壤孔隙度,同时降低了土壤容重,为土壤有机碳矿化提供了条件。

土壤有机碳是土壤养分的重要来源,其质量和数量直接影响土壤潜在生产力,是衡量土壤肥力水平的基础。本研究中,各植物群落土壤有机碳差异显著。这主要因为各植物群落其生长特征、根系生物量不同,导致地表枯落物和根系微生物不同,从而使土壤有机碳输入和输出产生差异<sup>[25]</sup>。通过相关分析发现土壤有机碳与根系生物量呈极显著正相关,再一次证明了植物群落根系是土壤有机碳主要驱动因子。尤其,银灰旋花显著小于短花针茅、洽草、羊草和克氏针茅 4 种禾本科植物,这主要是因为禾本科植物具有更好的净光合固碳效率,具有更高的凋落物和有机碳输入<sup>[26]</sup>。本研究发现各植物群落土壤有机碳整体随土层深度逐渐减小,与土壤根系生物量变化趋势相同。尤其 0—5 cm 土壤含碳量占总含量的 29.11%~37.75%。造成此现象主要有 3 个原因。其一,土壤表层黏粉粒含量增加,而黏粉粒能通过黏粒胶体的吸附对土壤有机碳起到保护作用,减少微生物对有机碳的分解和增加碳汇能力<sup>[6]</sup>;其二,植物根系分泌的物质能促进微生物活动,增加土壤有机碳含量;其三,由于各植物群落土壤表层累积大量的枯落物,其分解增加土壤有机碳的输入,增加土壤储碳能力<sup>[27]</sup>。

### 4 结论

(1) 各植物群落土壤容重和水分平均值分别介于 1.34~1.57 g/cm<sup>3</sup>, 5.68%~8.28% 之间。尤其银灰旋花土壤容重最大,不利于土壤有机碳积累。

(2) 6 种植物群落根系生物量随土层深度逐渐减小,且根系生物量总量介于 229.21~731.71 g/m<sup>2</sup>。植物群落根系多集中于 0—5 cm 土层,占总根系生物量的 58.42%~70.59%。

(3) 各植物群落土壤有机碳具有明显的表聚作用。0—30 cm 土层平均有机碳含量介于 6.07~11.75 g/kg。尤其洽草群落土壤有机碳含量最高。

(4) 根系生物量、土壤有机碳含量与黏粒含量呈极显著正相关,与粉粒含量呈显著正相关,表明土壤粉粒、黏粒含量越多,植物群落根系生物量和土壤有机碳越丰富。

#### 参考文献:

- [1] 韩丁,武佩,张强,等.基于颜色矩的典型草原牧草特征提取与图像识别[J].农业工程学报,2016,32(23):168-175.  
Han D, Wu P, Zhang Q, et al. Feature extraction and

- image recognition of typical grassland forage based on color moment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(23):168-175.
- [2] 柴曦,梁存柱,梁茂伟,等.内蒙古草甸草原与典型草原地下生物量与生产力季节动态及其碳库潜力[J].生态学报,2014,34(19):5530-5540.
- Chai X, Liang C Z, Liang M W, et al. Seasonal dynamics of belowground biomass and productivity and potential of carbon sequestration in meadow steppe and typical steppe, in Inn Mongolia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(19):5530-5540.
- [3] 高君亮,罗凤敏,高永,等.典型陆地生态系统土壤碳储量计算研究进展[J].生态科学,2016,35(6):191-198.
- Gao J L, Luo F M, Gao Y, et al. Review on the calculation of the soil carbon storage in typical terrestrial ecosystems[J]. Ecological Science, 2016,35(6):191-198.
- [4] Wu G L, Liu Y, Tian F P, et al. Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity[J]. Land Degradation & Development, 2016,28:1336-1344.
- [5] 贾宏涛,蒋平安,赵成义,等.围封年限对草地生态系统碳分配的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):33-36.
- Jia H T, Jiang P A, Zhao C Y, et al. The influence of enclosing life on carbon distribution of grassland ecosystem[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2009,27(1):33-36.
- [6] 谢莉,宋乃平,孟晨,等.不同封育年限对宁夏荒漠草原土壤粒径及碳氮储量的影响[J].草业学报,2020,29(2):1-10.
- Xie L, Song N P, Meng C, et al. Time course of changes in soil particle size and carbon and nitrogen reserves after fencing Ningxia desert step[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(2):1-10.
- [7] 许冬梅,许新忠,王国会,等.宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中土壤有机碳及其分布的变化[J].草业学报,2017,26(8):35-42.
- Xu D M, Xu X Z, Wang G H, et al. Variations in soil organic carbon content and distribution during natural restorationsuccession on the desert steppe in Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017,26(8):35-42.
- [8] Wang D, Liu Y, Wu Gaolin, et al. Effect of rest-grazing management on soil water and carbon storage in an arid grass-land[J]. Journal of Hydrology, 2015,527:754-760.
- [9] 耿林昇,李红丽,董智,等.放牧对希拉穆仁草原土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):121-126.
- Geng L S, Li H L, Dong Z, et al. Distribution characteristics of soil particle size in Xilamuren grassland with different grazing intensities[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(12):121-126.
- [10] 李文杰,乌铁红,李晓佳,等.内蒙古希拉穆仁草原旅游地景观格局动态变化[J].地理科学,2013,33(3):307-313.
- Li W J, Wu T H, Li X J, et al. Dynamic change of landscape pattern in Xilamuren grassland tourist area of Inner Mongolia [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013,33(3):307-313.
- [11] 黄昕,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原退化评价及地表风蚀颗粒表征[J].水土保持研究,2016,23(5):141-146,151.
- Huang X, Meng Z J, Wang J, et al. Degradation evaluation and characterization of surface wind erosion particles in Xilamuren grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(5):141-146,151.
- [12] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018,10(2):1-14.
- [13] 张婧,左小安,吕朋,等.科尔沁沙地草地植被对围封和放牧的响应[J].中国沙漠,2017,37(3):446-452.
- Zhang J, Zuo X A, Lv P, et al. Response of grassland vegetation in Horqin Sandy Land to enclosure and grazing [J]. Journal of Desert Research, 2017,37(3):446-452.
- [14] 刘军秀.荒漠草原区丘陵不同地貌部位土壤理化性质与植被生长状况研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2016.
- Liu J X. Study on soil physical and chemical properties and vegetation growth status at different geomorphological positions of the hilly in desert steppe[D]. Hohhot:Inner Mongolia Normal University, 2016.
- [15] 黄昕.希拉穆仁荒漠草原不同植被盖度下土壤理化性质的诊断[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- Huang X. Soil properties and vegetation characteristics characterization and Judgment of different coverage Xilamuren desert grassland[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [16] 周义贵.岷江上游干旱河谷区不同土地利用/植被恢复类型土壤生态效益评价[D].四川雅安:四川农业大学,2014.
- Zhou Yigui. Evaluation on soil ecological benefits in different land-use/vegetation restoration in the key region of the overreaches of minjiang River valley[D]. Ya'An, Sichuan:Sichuan Agricultural University, 2014.
- [17] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.
- Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland[J]. Transactions of the Chinese Soci-



- ety for Agricultural Machinery, 2014,45(1):115-120.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis[M].Third Edition. Beijing:China Agricultural Press, 2000.
- [19] Banger K, Kukal S S, Toor G, et al. Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farm yard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. Plant and Soil, 2009,318(2):27-35.
- [20] 王琴,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J].生态学报,2017,37(4):1159-1167.
- Wang Q, Meng Z J, Wang J, et al. Response of the vegetation soil under almost-natural restoration in the Xilamuren grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1159-1167.
- [21] 邵新庆,王堃,王赟文,等.典型草原自然恢复演替过程中植物群落动态变化[J].生态学报,2008,28(2):855-861.
- Shao X Q, Wang K, Wang Y W, et al. Dynamics of plant community during natural restoration and succession of the Inner Mongolia Steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):855-861.
- [22] 胡雷,王长庭,阿的鲁骥,等.高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J].西南民族大学学报:自然科学版,2015,41(1):6-11.
- Hu L, Wang C T, Adiluji, et al. Relationship between root biomass, soil organic carbon and soil mechanical composition in alpine meadow[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2015,41(1):6-11.
- [23] 魏巍,周娟娟,白玛嘎翁,等.西藏不同草地类型群落根系分布特征与土壤因子的关系[J].中国草地学报, 2018,40(6):33-38,46.
- Wei W, Zhou J J, Baima G W, et al. Variation analysis of morphological characterization related to yield in introduced annual ryegrass germplasma[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018,40(6):33-38,46.
- [24] 牛存洋,阿拉木萨,刘亚,等.科尔沁沙地固沙植物根系与土壤水分特征研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):106-111.
- Niu C Y, Ala M S, Liu Y, et al. The characteristics of sand-fixation plantations roots and soil moisture in Horqin sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(10):106-111.
- [25] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of Southwest China[J]. Plant Ecology, 2014,215:1099-1109.
- [26] 王园博,赵锐锋,张丽华,等.黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素[J].草业科学,2020,37(5):833-844.
- Wang Y B, Zhao R F, Zhang L H, et al. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland[J]. Pratacultural Science, 2020,37(5):833-844.
- [27] 荆佳强,萨仁其力莫格,秦洁,等.利用方式对贝加尔针茅草原土壤微生物群落结构与土壤酶活性的影响[J].中国草地学报,2022,44(2):33-40.
- Jing Jiaqiang, Sarenqili Moge, Qin Jie, et al. Effects of utilization methods on soil microbial community structure and soil Enzyme activity in *Stipa baicalensis* steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(2): 33-40.

(上接第 34 页)

- [21] 朱凯,马茂华,李文娟,等.三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J].长江流域资源与环境,2022,31(7):1503-1513.
- Zhu K, Ma M H, Li W J, et al. Effects of land-use types on soil aggregate stability and organic carbon and nitrogen in riparian 'zone of Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2022,31(7):1503-1513.
- [22] 杨玉梅,郑子成,李廷轩.不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J].水土保持学报, 2010,24(4):64-68.
- Yang Y M, Zheng Z C, Li T X. Soil Anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4): 64-68.
- [23] 周维,张建辉,李勇,等.金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J].水土保持通报,2006,26(5):26-30,42.
- Zhou W, Zhang J H, Li Y, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):26-30,42.